

文章编号: 1000-7598 (2013) 05-1397-06

应力监测在公路岩质边坡中的应用研究

郭永建^{1,2}, 王少飞³, 李文杰⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 4. 广东省公路建设有限公司, 广州 510600)

摘 要: 针对山区高速公路岩质边坡数量大、失稳难以及时预警的问题, 提出对边坡支护锚杆进行应力监测的方式以评价其稳定性。以广陕高速改扩建工程沿线的一处典型岩质边坡为例, 采用 FLAC^{3D} 软件对岩质边坡的开挖支护过程进行模拟, 利用强度折减法分析随岩体强度降低过程中支护锚杆的轴力变化规律, 确定应力监测预警值, 并结合现场试验结果对边坡安全状况进行评价。研究表明, 试验边坡监测位置应以泥岩结构面处为主, 应力监测预警是一个整体的预警系统, 监测点位任一达到预警值均应提出预警。监测结果显示, 应力监测在 120 d 时出现明显变化, 而位移变化则较为滞后, 在 167 d 后才出现明显变化; 综合应力与位移监测的结果可以得出, 试验边坡处于安全运营状态, 所提出的应力监测评价公路岩质边坡的稳定性具有可行性。

关 键 词: 道路工程; 岩质边坡; 应力监测; 强度折减法; 预警

中图分类号: U 416.1

文献标识码: A

Application of stress monitoring to highway rock slope

GUO Yong-jian^{1,2}, WANG Shao-fei³, LI Wen-jie⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
4. Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: In light of the problems of that the highway rock slopes have large numbers and slope stability is hardly to predict in time, the stress monitoring method of the anchoring rock bolt is used to evaluate slope stability. Typical slope along Guangyuan-Shaanchuan expressway reconstruction as the example, the FLAC^{3D} software is taken to simulate the excavating and support process of the rock slope, and the strength reduction method is taken to analyze the change of rock bolt axial force during the rock mass strength reduction process, the monitoring values are obtained; and combined with the result of field test to evaluate the slope stability. The research results show that the mainly monitoring locations should be at mudstone structures, and the stress monitoring is a wholly system; so that the early warning should be made if axial force values at any locations reached the early warning values; The result of field test shows that the stress monitoring has obvious change at 120 d, while the displacement change has a time lag, it appear obvious change at 167 d; from the results of stress monitoring and displacement monitoring, a conclusion is drawn that the slope keep in a state of safety operation, so the proposed stress monitoring method can be applied to evaluate the highway rock slope stability.

Key words: highway engineering; rock slope; stress monitoring; strength reduction method; early warning

1 引 言

山区修建高速公路不可避免地会产生大量的岩质边坡, 这些边坡的安全状况影响着公路的安全运营。一般在设计与施工中均对这类边坡做一定的锚杆支护处理, 同时对其运营过程进行监控。较为常见的监控方式为变形监测, 但由于该监测方式需要另外埋设监测设备进行监测, 不仅增加了施工工序

和成本, 而且很难做到及时有效的预警; 如果能够对支护工程中的锚杆受力进行应力监测, 则能同时取得经济和及时预警的效果。

应力监测的研究由来已久, 陈祖煜等^[1]采用应力监测对漫湾水电站左线边坡进行长达 2 a 的监测, 不仅评价了边坡的稳定性, 还得出应力变化受开挖效应等因素的影响; 朱焕春^[2]针对三峡临时船闸及升船机高边坡、郭冬生^[3]针对三峡永久船闸二期工

收稿日期: 2012-05-22

基金项目: 西部交通建设科技项目(No. 2009310000003)。

第一作者简介: 郭永建, 男, 1985 年生, 在站博士后, 主要从事边坡、隧道工程的锚固方面的研究工作。E-mail: guoyongjian1985@163.com

程边坡的稳定性采用应力监测进行评价,均取得了较好的监测效果,并得出应力监测存在开挖效应、温度效应和时效变形效应;刘祖强^[4]对三峡永久船闸一期高边坡进行应力监测,通过分析应力变化的趋势分量增量来评价边坡的稳定性;何满潮^[5]在矿山边坡应力监测中通过监测预应力锚索的应力增长模式预警边坡,认为当受力达到初始预应力的(1.4~2.0)倍时,需要进行预警。

当前针对应力监测问题的研究结论大多基于现场监测^[6-10],即集中于实际应用效果的研究。对岩质边坡的应力监测机制与应力监测的预警合理性问题并没有进行深入的分析,本文结合理论与数值方法对该问题进行探讨,并以广陕高速的一段岩质高边坡工程为例进行分析,对应力监测做进一步研究。

2 应力监测力学机制探讨

对于支护之后的岩质边坡安全系数计算公式,Londe认为,应分为主动锚与被动锚两种不同的计算形式进行计算,并建议主动锚——预应力锚索支护的岩质边坡安全系数计算公式^[11-12]为

$$k = \frac{F}{W - T \sin \theta} \quad (1)$$

式中: W 为下滑力; F 为抗滑力; T 为预应力锚索最大加固力; θ 为锚索方向角。

而对于被动锚——全长黏结锚杆支护的岩质边坡安全系数计算公式为

$$k = \frac{F + T_1}{W} \quad (2)$$

式中: T_1 为锚杆最大锚固力。

由于本文仅针对在公路岩质边坡中应用较广的被动锚进行分析,所以仅对式(2)做进一步分析研究。被动锚的受力分析简图如图1所示,按受力分析图示将式(2)展开得到以下形式:

$$k = \frac{G \cos \alpha \tan \varphi + cL + T_1}{G \sin \alpha} \quad (3)$$

式中: α 为滑动面倾角; c 、 φ 为滑动面强度参数; L 为结构面长度; G 为单位岩体重力。

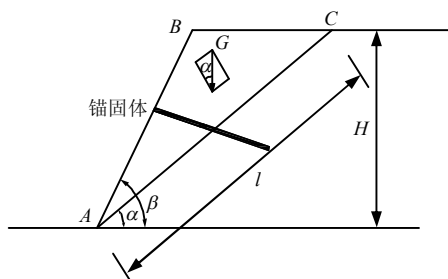


图1 边坡稳定性计算模型
Fig.1 Slope stability calculation model

式(3)所表达的形式是针对锚固力最大发挥时边坡的安全系数,而不是针对边坡运营过程中随着滑动面位置处的强度参数不断降低的公式,后者的公式应表述为

$$k' = \frac{G \cos \alpha \tan \varphi' + c'L + T'}{G \sin \alpha} \quad (4)$$

式中: k' 为不同时刻的边坡安全系数; c' 、 φ' 为不同时刻的滑动面强度参数; T' 为不同时刻的锚杆锚固力, $0 \leq T' \leq T_1$ 。

安全系数 k' 是与强度参数以及锚固力相关的泛函,随着滑动面位置处强度参数值不断降低,锚固力 T' 不断增大,安全系数也不断变化。将式(4)展开得

$$T' = k'G \sin \alpha - G \cos \alpha \tan \varphi' - c'L \quad (5)$$

式(5)表明,全长黏结锚杆的锚固力发挥与滑动面强度参数大小有关,而且存在一定的规律性,这种规律受边坡坡度与岩性等因素的影响而较为复杂。但这种规律可以采用数值分析与现场应力监测的方式进行确定,从而评价边坡的安全状况,及时有效预警。

以下以广元至陕川高速公路(简称广陕高速)改扩建工程的一处岩质高边坡为例,对应力监测的实际应用效果进行研究。

3 工程概况

工程边坡位于广陕高速改扩建工程K47+737—K47+960位置处,公路沿线场区大地貌单元为侵蚀低山山地地貌,地势西高东低,南北向地形起伏不大。垂直路肩墙方向地形起伏变化大,陡缓相间,呈阶梯状,为陡坎斜坡平坦地形。根据钻探及地质调研成果资料,地层岩性以砂岩为主,包括:①全风化砂岩:砂质结构,中厚层状构造,易碎,岩芯破碎,呈碎块状;②强风化砂岩:细粒结构,薄层状构造,矿物成分以长石、石英、云母为主,次为岩屑等,泥钙质、孔隙式胶结,岩芯以碎块状、薄饼状为主;③弱风化砂岩:细粒结构,厚层状构造,矿物成分以长石、石英、云母为主,次为岩屑等,泥钙质胶结,岩芯呈柱状、长柱状,以长柱状为主。

边坡的工程地质概况如图2所示,边坡为4级边坡,最大高差为37.5 m,属于典型的公路岩质高边坡,岩层产状为 $339^\circ \angle 18^\circ$,通过现场勘测得出在1、2级边坡处各存在一组软弱泥质结构面,严重影响边坡的稳定性。针对该问题,设计该边坡时,采用3级以上边坡放缓坡率的形式;下部边坡采用锚杆框架梁支护的形式。具体设计为:1、2级边坡

坡度为 1:0.75, 采用锚杆框架梁植草防护形式; 3、4 级边坡坡度为 1:1, 采用菱形骨架植草防护形式。支护锚杆长度为 2 级边坡 12 m、1 级边坡 9 m, 埋设角度均与水平面成 10° 夹角, 锚杆间距为 3 m。

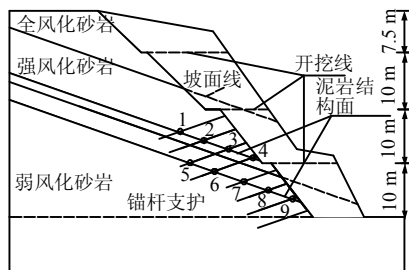


图2 工程地质图

Fig.2 Engineering geological map

4 数值计算模拟分析

通过数值计算方法分析应力监测中锚杆轴力与边坡岩体强度折减系数之间的关系, 并确定预警值, 为实际监测提供预警参考。计算采用模拟锚固效果较好的 FLAC^{3D} 软件进行分析, 针对该软件在建立复杂模型上的不足, 首先利用 ANSYS 软件将网格

剖分完成 (如图 3 所示), 然后利用 ANSYS—FLAC^{3D} 程序将模型导入到 FLAC^{3D} 中进行计算, 其中结构面单元采用 interface 单元的形式进行模拟, 锚杆单元采用双弹簧 cable 单元进行模拟^[13]。

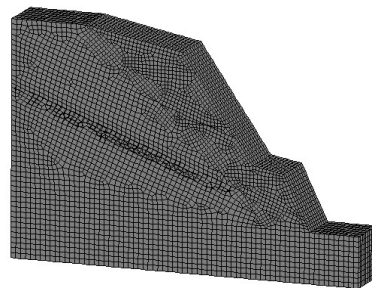


图3 数值计算模型

Fig.3 Numerical calculation model

计算选择的主要岩石力学参数如表 1 所示, 锚固体计算参数为: 锚杆弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.2$, 直径为 32 mm, 钻孔直径为 100 mm, 轴力设计最大值为 241 kN; 注浆体黏结力为 1 400 kN/m, 摩擦角为 25° , 注浆体刚度为 $1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。锚杆应力监测点位以两组结构面位置处为主, 具体如图 2 所示的 1~9 点位。

表1 岩石物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rocks

岩土类别	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /GPa	抗剪强度		泊松比	抗压强度/MPa		剪切刚度 /(GPa/m)	法向刚度 /(GPa/m)
			内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa		天然	饱和		
全风化砂岩	2.30	0.22	20.0	62	0.29	26.50	20.80		
强风化砂岩	2.52	1.60	29.0	340	0.25	32.41	21.46		
弱风化砂岩	2.77	9.10	36.5	2 020	0.20	43.24	36.58		
泥岩结构面			15.0	23				0.13	0.52

图 4、5 为数值计算得出的开挖过程中锚杆轴力变化图, 轴力在开挖及时支护后变化量较大, 2 级边坡点位 4 处锚杆轴力数值最大, 为 34.9 kN; 点位 2、9 处锚杆轴力基本为 0, 这是由于点位 2 处位于锚杆布设位置的中间处, 下滑力为点位 1 处锚杆所抵消, 而滑体在坡面剪出时, 首先会在结构面坡面出露位置处产生位移, 点位 4 的锚杆首先提供反力抑制变形的原因。由于 2 级边坡及时支护, 在 1 级边坡开挖之前已经支护了部分在 1 级边坡出露的结构面, 所以该结构面没有产生大的位移, 从而使得点位 9 处的锚杆轴力较小。

由于边坡实际运营过程中, 结构面位置处的岩体参数在降雨、风化等因素影响下将会进一步的降低, 边坡的安全状况也会随之降低。采用强度折减法对结构面岩体参数降低并使边坡达到失稳的过程进行模拟^[14-16], 折减计算得出支护后边坡的安全系

数为 1.75, 边坡潜在滑动面位于 2 级边坡泥岩结构面位置处。结合图 4、5 可得出点位 3、4、7、8 处的锚杆轴力变化曲线较为明显, 该点位 4 处的锚杆轴力随折减系数变化的数据具有进一步分析的价值, 较适宜作为应力监测边坡安全性的点位。

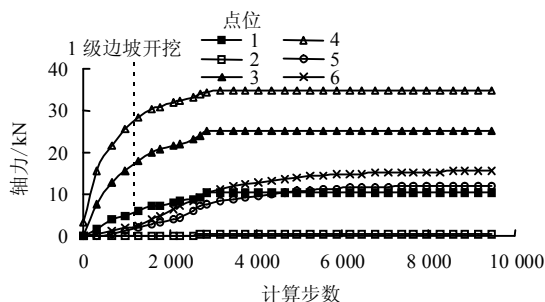


图4 2级边坡锚杆轴力计算结果

Fig.4 Numerical results of rock bolt axial force of the second stage of slope

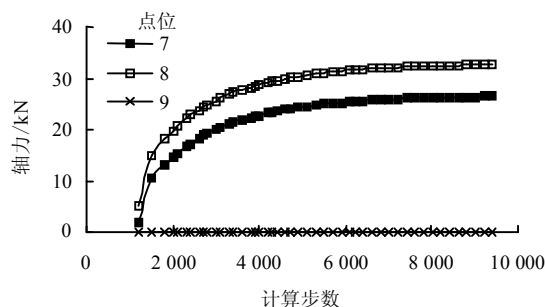


图 5 1 级边坡锚杆轴力数值计算结果
Fig.5 Numerical results of rock bolt axial force of the first stage of slope

图 6、7 为计算得出的监测点位 3、4、7、8 处锚杆轴力随折减系数的变化关系，可以得出轴力随强度变化的关系较为平缓，不存在难以准确预警的拐点，监测预警易于把握。根据曲线形态采用一次线性函数对 2 级边坡计算结果进行拟合；采用二次抛物线函数对 1 级边坡监测结果进行拟合。对点位 4 的计算曲线进行拟合的结果如表 2 所示，拟合结果具有较高的相关系数，其中 y 为监测轴力， x 为折减系数。

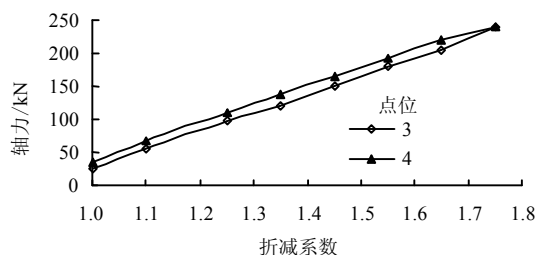


图 6 2 级边坡锚杆轴力-折减系数关系
Fig.6 Relations between rock bolt axial force and reduction factor of the second stage of slope

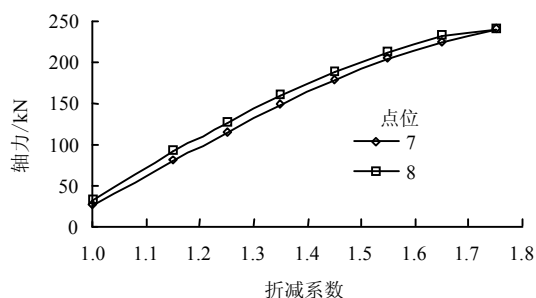


图 7 1 级边坡锚杆轴力-折减系数关系
Fig.7 Relations between rock bolt axial force and reduction factor of the first stage of slope

根据《公路路基设计规范》要求^[17]，岩质边坡安全系数应在 1.2~1.3 以上，通过计算得出安全系数为 1.3 时的锚杆轴力预警值如表 2 所示，现场监测中若任一处锚杆轴力达到计算预警值，均应提出预警，特别当锚杆轴力持续增加时，应增加监测频率，确保预警及时有效。

表 2 轴力-折减系数拟合关系

Table 2 Fit relations between rock bolt axial force and reduction factor

位置	轴力-折减系数拟合关系	预警值/kN
3	$y = 282.06x - 256.96, R^2 = 0.9987$	118
4	$y = 274.77x - 235.52, R^2 = 0.9986$	133
7	$y = -152.49x^2 + 710.87x - 533.94, R^2 = 0.9992$	140
8	$y = -213.74x^2 + 869.91x - 624.5, R^2 = 0.9995$	151

5 现场试验监测分析

现场试验取 K47+800 断面进行应力监测分析，锚杆测力钢筋计焊接布设位置如图 8 所示，钢筋计编号与数值计算监测点（如图 2 所示）相对应，并增加了 0 点位；作为对比，选择 2 级平台位置处理设长 14 m 的测斜管进行岩体深部位移监测。

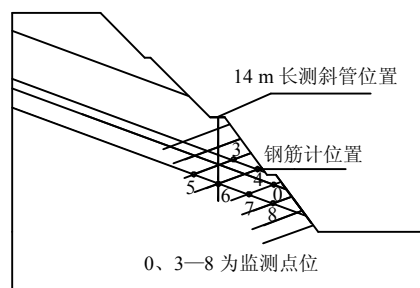


图 8 现场试验监测部位
Fig.8 Field test monitoring locations

应力监测结果如图 9、10 所示，监测时间从 2010 年 1 月 1 日开始，至 2010 年 7 月 30 日结束，共历时约 210 d，其中 1 级边坡开挖和支护监测时间稍晚于 2 级边坡。锚杆轴力在砂岩交界位置处——1 级边坡的点位 0，轴力较小，数值基本为 0，没有监测到轴力的变化，可见有效的应力监测部位需要精确“捕捉”；锚杆轴力变化较大的位置主要集中在结构面附近——1 级边坡的点位 7、8，2 级边坡的点位 3~6，与数值计算的结果相同。2 级边坡受两组结构面控制，监测轴力主要在结构面处变化，轴力最大值出现在点位 4 处，监测最大轴力为 16.2 kN，该位置属于潜在滑动面位置；1 级边坡的点位 7、8 处锚杆轴力变化基本相同，监测最大轴力为 13.3 kN，轴力均逐渐趋于稳定。对照表 2 的各监测点位的监测预警值，收敛后的锚杆轴力值没有达到预警值。图 9 中监测锚杆初期轴力为负值，呈现受压的情况，这是由于后期框架梁的加设反压所引起的，数值较小，可以忽略。现场试验的监测结果要小于数值计算结果，且现场监测经过一个旱雨季的交替，数据基本趋于稳定，从安全角度考虑，可近似认为该边坡的安全系数为 1.75。

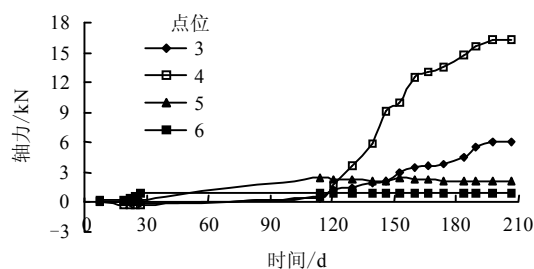


图9 2级边坡锚杆轴力监测结果

Fig.9 Monitoring results of rock bolt axial force of the second stage of slope

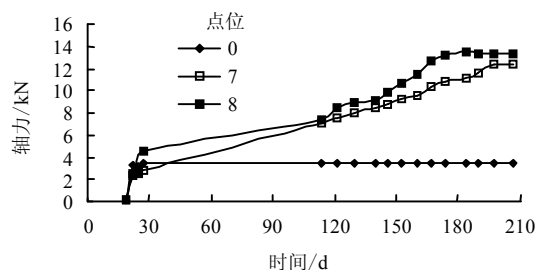


图10 1级边坡锚杆轴力监测结果

Fig.10 Monitoring results of rock bolt axial force of the first stage of slope

位移监测结果如图 11 所示,位移在 2 级边坡位置处变化明显,表明上部结构面对边坡的安全性产生的影响较大,这与数值计算和锚杆轴力监测结果相一致。通过对比锚杆轴力变化图 9 与深部位移监测图 11,可以得出点位 4 处的锚杆轴力在 120 d 后出现明显变化,而位移则在 167 d 后才出现明显变化。位移变化明显的时间要滞后于应力,监测得出边坡的最大变形为 11.3 mm,数据趋于稳定。综合应力与位移监测的结果,认为该边坡处于安全运营状态。

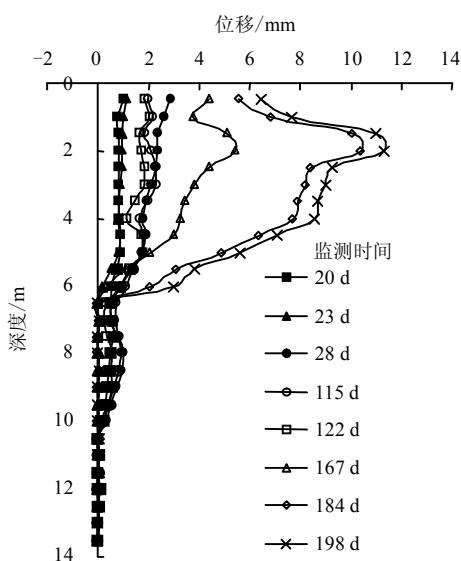


图11 深部位移监测结果

Fig.11 Monitoring results of deep displacement

6 结 论

(1) 通过理论分析对应力监测的机制进行探讨,建立岩质边坡锚固力与安全系数之间的关系,从理论上说明了应力监测的可行性。

(2) 数值计算的结果表明,广陕高速改扩建工程 K47+737~K47+960 处岩质高边坡的应力监测数据变化较为平缓,监测预警易于把握,锚杆轴力的变化规律可以采用一次、二次函数进行拟合。

(3) 对比位移与应力监测的现场试验结果,应力出现变化的时间要早于位移变化,公路岩质边坡适宜采用应力监测的方法进行稳定性评价。

参 考 文 献

- [1] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [2] 朱焕春. 某边坡锚杆应力状态测试与分析[J]. 岩土工程学报,2000,22(4): 471—473.
ZHU Huan-chun. Measurements and analysis of bolt stresses at a slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(4): 471—473.
- [3] 郭冬生. 三峡永久船闸高强锚杆施工与锚杆应力分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(2): 257—260.
GUO Dong-sheng. Stress analysis and installation procedures of rock bolt for permanent shiplock of TGP[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2): 257—260.
- [4] 刘祖强,廖勇龙,朱全平. 三峡永久船闸一期高边坡监测锚杆应力分析[J]. 长江科学院院报,2004,21(1): 40—43.
LIU Zu-qiang, LIAO Yong-long, ZHU Quan-ping. Analysis of first-stage monitoring anchor bar stress on high slope of TGP permanent lock during operation[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2004, 21(1): 40—43.
- [5] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(6): 1081—1090.
HE Man-chao. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1081—1090.

- [6] 娄国充, 卜建清. 土钉支护软岩高边坡的监测与滑裂面的确定[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 106—111.
LOU Guo-chong, BU Jian-qing. Field monitoring of a high slope of weak rocks with soil-nailing support and determination of the slip surface[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(3): 106—111.
- [7] 尚文涛, 郭国和, 王震. 土质高边坡安全监测及稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27 (增刊 1): 956—960.
SHANG Wen-tao, GUO Guo-he, WANG Zhen. Analysis on safety monitoring and stability of high soil slope[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)**, 2008, 27(Supp. 1): 956—960.
- [8] 娄国充, 康中山, 郭增强. 土钉支护结构的施工监测与变形控制[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 323—327.
LOU Guo-chong, KANG Zhong-shan, GUO Zeng-qiang. Monitoring the deformation of the soil-nailing support structure and its control[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2004, 12(3): 323—327.
- [9] 娄国充, 周德培. 软岩高边坡土钉支护的监测分析与优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2734—2738.
LOU Guo-chong, ZHOU De-pei. Monitoring and design optimization of soil-nailing support for high weak rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(16): 2734—2738.
- [10] 赵明阶, 谢鑫, 汪魁. 基于边坡锚固荷载监测数据的反分析[J]. 水利水运工程学报, 2011, (1): 44—48.
ZHAO Ming-jie, XIE Xin, WANG Kui. Back analysis based on slope anchor load monitoring data[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2011, (1): 44—48.
- [11] HOEK E, BRAY J W. 岩石边坡工程[M]. 卢世宗, 李成村, 夏继祥, 等译. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [12] HOEK E, BROWN E T. Practical estimate the rock mass strength[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(8): 1165—1186.
- [13] 林杭, 曹平, 宫凤强. 位移突变判据中监测点的位置和位移方式分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1433—1438.
LIN Hang, CAO Ping, GONG Feng-qiang. Analysis of location and displacement mode of monitoring point in displacement mutation criterion[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1433—1438.
- [14] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332—336.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 332—336.
- [15] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381—3388.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM to soil and rock slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3381—3388.
- [16] 李春光, 朱宇飞, 刘丰, 等. 基于下限原理有限元的强度折减法[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1816—1821.
LI Chun-guang, ZHU Yu-fei, LIU Feng, et al. Evaluation of strength reduction factor by lower bound limit analysis using finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1816—1821.
- [17] 中华人民共和国交通部. JTJ D30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.